

Apparative Voraussetzungen für Erkenntnisfortschritte in der Psychophysik des Farbensehens*

Hans Irtel

Universität Mannheim

Die Psychophysik des Farbensehens ist eines der ältesten und erfolgreichsten Forschungsthemen der experimentellen Psychologie. An ihrer Entwicklung läßt sich zeigen, daß auch in der Psychologie für den Fortschritt empirisch-experimentell orientierter Forschung die Entwicklung neuer apparativer Möglichkeiten eine Voraussetzung für die erfolgreiche experimentelle Untersuchung neuer wissenschaftlicher Fragestellungen ist.

Die Psychophysik einer bestimmten Sinnesmodalität hat traditionell 4 grundlegende Fragestellungen zu beantworten:

1. Was ist der für eine bestimmte Empfindungsqualität adäquate Reiz?
2. Wie groß muß die Intensität eines Reizes sein, damit er gerade wahrgenommen werden kann?
3. Wie stark müssen sich zwei Reize mindestens unterscheiden, damit sie gerade als unterschiedlich wahrgenommen werden können?
4. Wie hängt die wahrgenommene Intensität eines Reizes von dessen physikalischen Eigenschaften, insbesondere seiner Intensität ab?

Für die Frage nach dem adäquaten Reiz für eine bestimmte Empfindungsqualität, also dem Reiz, der mit dem geringstmöglichen Energie- oder Materialaufwand die entsprechende Empfindung erzeugen kann, gibt es keine speziellen psychophysischen Methoden. In den meisten Sinnesbereichen handelt es sich dabei um eine qualitative Fragestellung, deren Beantwortbarkeit wesentlich vom Fortschritt der Physik und Chemie mitbestimmt ist. Man denke etwa an Geruchs- oder Geschmacksempfindungen, wo auch heute noch große Lücken in der Bestimmung der für bestimmte Empfindungsqualitäten adäquaten Reize bestehen. Aber auch in gut untersuchten Sinnesbereichen kann, wie wir sehen werden, diese Frage nicht immer vollständig beantwortet werden.

Im Gegensatz zur Frage nach dem adäquaten Reiz stehen für die Untersuchung der weiteren, oben genannten Grundfragen der Psychophysik umfangreiche Methoden zur Verfügung. Die zweite und dritte der genannten Fragestellungen werden jeweils unter dem Stichwort „Detektion“ und „Diskrimination“ mit Hilfe psychometrischer Methoden oder mit Hilfe von Techniken untersucht, die auf der Theorie der Signalentdeckung aufbauen. Der Zusammenhang zwischen Reiz- und Empfindungsintensität

schließlich ist der Gegenstand psychophysischer Skalierungsmethoden, wie sie etwa von Fechner (1860) und Stevens (1975) vorgeschlagen wurden.

Die Entdeckung des adäquaten Reizes für Farbempfindungen

Der wesentliche Schritt zur Bestimmung des adäquaten Reizes für die Wahrnehmung chromatischer Farben stammt von Newton (1672). Ihm gelang es, die physikalischen Eigenschaften des Lichts so weit aufzuklären, daß durch geeignete physikalische Manipulation eines Lichtstrahls nahezu jede mögliche Farbempfindung erzeugt werden kann. Newton konnte zeigen, daß ein Sonnenlichtstrahl durch ein Prisma in Komponenten zerlegt wird, die farbig aussehen, selbst nicht weiter zerlegt werden können und durch Übereinanderprojizieren wieder zu unbunt aussehendem Licht werden. Er fand den Zusammenhang zwischen der Brechbarkeit des Lichts und seiner Chromatizität: „Lights which differ in Colour, differ also in degrees of refrangibility“ (Newton, 1730, S. 20). Dabei erkannte Newton sehr wohl den Unterschied zwischen der physikalischen Eigenschaft „Brechbarkeit“ und der psychologischen Eigenschaft „Farbigkeit“:

And if at any time I speak of Light and Rays as coloured or endued with Colours, I would be understood not to speak philosophically and properly, but grossly, and accordingly to such Conceptions as vulgar People in seeing all these Experiments would be apt to frame. For the Rays to speak properly are not coloured. In them there is nothing else than a certain Power and Disposition to stir up a sensation of this or that Colour. [...] so Colours in the Object are nothing but a Disposition to reflect this or that sort of Rays more copiously than the rest; in the Rays they are nothing but their Dispositions to propagate this or that Motion into the Sensorium, and in the Sensorium they are Sensations of those Motions under the Forms of Colours (Newton, 1730, S. 124f).

Eine vollständige Lösung des Problems, den Reiz für beliebige Farbempfindungen anzugeben, ist bis heute nicht gelungen. Dafür wäre beispielsweise anzugeben, welche Reize braun erscheinen. Dies sind nicht einfach bestimmte elektromagnetische Strahlungsverteilungen, sondern es ist

*Vortrag im Rahmen des Symposiums „Geschichte der Apparativen Psychologie“, 1994, Universität Graz.

dazu auch deren räumliche Verteilung zu berücksichtigen, da es sich bei Braun um eine Farbe handelt, die nur unter bestimmten Kontrastbedingungen auftritt. Die Wirkung, die komplexe, räumliche Verteilungen auf die Erscheinungsweise eines Farbreizes haben, ist bis heute aber noch nicht zufriedenstellend aufgeklärt.

Additive und subtraktive Farbenmischung

Das wichtigste Problem der Farbenlehre war lange vor Newton und auch noch später bis zur Mitte des 19. Jahrhunderts die Frage, wie die Vielfalt aller möglichen Farben aus einigen wenigen Grundkomponenten hergestellt werden kann, das Problem der Farbenmischung also. Bis Ende des 17. Jahrhunderts war die Grundlage aller Farbsysteme die Mischung von Farbpigmenten. Physikalisch betrachtet ist das Ergebnis dieser heute so genannten „subtraktiven Farbenmischung“ das Produkt der Reflektanz- bzw. der Transmissionsfunktionen der beteiligten Komponenten. Diese Art der Mischung ist aber für die Konstruktion psychologischer Farbsysteme ungeeignet, ein Sachverhalt, der erst von Grassmann (1853) begründet werden konnte.

Subtraktive Farbenmischung ist als Grundlage einer psychologischen Farbenlehre ungeeignet, weil es zwischen ihr und der Struktur des psychologischen Farbraums keine Gemeinsamkeiten gibt. Das oben erwähnte Skalierungsproblem der Psychophysik ist aber nur dann lösbar, wenn die Abbildung des Reizgeschehens in das Wahrnehmungsgeschehen gewisse strukturerhaltende Eigenschaften hat. Darin spiegelt sich die Orientierungsfunktion der Wahrnehmung: Für eine erfolgreiche Orientierung in der Umwelt darf die Struktur der wahrgenommenen Welt von der physikalischen nicht zu stark abweichen. Für die sogenannte „additive Farbenmischung“ ist dies der Fall. Dies zeigt das Prinzip der Additivität von Farbgleichungen: Sind a und b zwei gleich aussehende Farbreize und ist c ein beliebiger dritter Farbreiz, der zu den beiden anderen hinzuaddiert wird, dann sehen auch die Reize $a+c$ und $b+c$ gleich aus. Für die subtraktive Mischung der Reize a und c , also für die Multiplikation ihrer Spektren, gilt keine vergleichbare Invarianzbedingung.

Von Grassmann (1853) wurde gezeigt, daß sich auf der Grundlage der Additivität von Farbgleichungen die Addition der Farbreize in eine Addition von Farben übertragen läßt. Sei $F(a)$ die Farbe des Reizes a , $F(b)$ die Farbe des Reizes b , dann ist $F(a + b)$ die Farbe des Reizes $a + b$. Die „Farbe eines Reizes a “ ist im System Grassmanns die Äquivalenzklasse aller mit a unter allen Umständen gleichfarbigen Reize.

Additive Farbenmischungen können durch Überlagerung der Strahlungsverteilungen zweier Reize erzeugt werden. Newton war der erste, der hierzu in systematischer Weise Prismen und Linsen benutzte und versuchte, die Regeln der Farbenmischung auf der Grundlage additiver Überlagerungen von Spektren zu untersuchen. Newtons Beitrag zur Farbenlehre geht damit weit über die Entdeckung wesentlicher Reizeigenschaften hinaus. Er schlug auch die sogenannte Schwerpunktregel zur Bestimmung

von Farbenmischungen vor. Sie besagt, daß sich die Farbe einer Mischung mehrerer Lichtstrahlen als Summe der mit den relativen Intensitäten gewichteten Farbkomponenten berechnen läßt. Stellt man die Farbkomponenten als Punkte einer Ebene dar, so bildet die Farbe der Mischung den Schwerpunkt der geometrischen Figur, die von den Komponenten aufgespannt wird, sofern deren Stützpunkte mit den jeweiligen Intensitäten gewichtet werden.

Die Newtonsche Schwerpunktregel war auch die Grundlage der bedeutendsten Fortschritte in der Psychophysik des Farbsehens, die um die Mitte des 19. Jahrhunderts von Maxwell, Helmholtz und Grassmann erzielt wurden. Die Unzulänglichkeit der verfügbaren Prismen und die mangelnde Intensität künstlicher Lichtquellen zum Erzeugen schmalbandiger Spektren mögen der Grund sein, warum das Newtonsche System der Farbenmischung bis in die Mitte des 19. Jahrhunderts keinen Eingang in die Farbenlehre fand. Selbst Helmholtz (1852) kam, wie er in Helmholtz (1855) berichtet, aufgrund schlecht geschliffener Prismen und zu schwacher Lichtquellen zu falschen Ansichten über die Möglichkeiten der Konstruktion von Komplementärfarben.

Einer der heftigsten Kritiker der Newtonschen Lehre war Goethe (1810). Ein großer Teil seiner Farbenlehre befaßt sich damit, die Newtonschen Beobachtungen als mit seinen eigenen im Widerspruch stehend darzustellen. Goethe unterliefen allerdings 2 wesentliche methodische Fehler: 1. hielt er die Prismen direkt vor die Augen und beobachtete durch das Prisma anstatt einen dünnen Lichtstrahl durch das Prisma auf eine Projektionsfläche zu werfen und 2. verwechselte Goethe die subtraktive und additive Farbenmischung. So schreibt er etwa über die Behauptung Newtons, man könne aus den Spektralfarben Weiß mischen: „Man stelle sich diese Farben (die des Spektrums) liquide vor und sehe, was herauskommt, wenn man sie zusammenstreicht (Goethe, 1810, S. 457).“ Natürlich ist Goethes Aussage für die subtraktive Mischung korrekt, Newtons Behauptung bezieht sich aber auf additive Mischung.

Maxwell, Helmholtz und Grassmann: der Durchbruch zur Mitte des 19. Jahrhunderts

Der Schotte James Clerk Maxwell begann 1849 in Edinburgh systematische Untersuchungen der Regeln der additiven Farbenmischung. Er benutzte dazu Farbscheiben, die durch eine radiale Öffnung ineinander gesteckt werden konnten, so daß die Größe der jeweiligen Farbsektoren kontinuierlich zu verändern war. Die Scheiben wurden in Rotation versetzt, so daß die einzelnen Sektoren zu einem homogenen Farbeindruck verschmolzen. Solche Farbkreisel waren bereits früher bekannt, auch Goethe besaß einen, Maxwell war jedoch der erste, der sie benutzte, um in Anwendung der Newtonschen Schwerpunktregel damit eine Farbtafel zu konstruieren.

Maxwells Ergebnisse wurden erst 1855 publiziert (Maxwell, 1855). Bereits 1852 erschien eine Arbeit von Helmholtz (Helmholtz, 1852), in der er die wesentlichen Un-

terschiede zwischen additiver und subtraktiver Farbmischung klarstellt und begründet, daß nur die additive Mischmethode für die Untersuchung der Farbwahrnehmung von Bedeutung ist. Der Grund dafür ist die oben bereits beschriebene Strukturähnlichkeit des Raums der wahrgenommenen Farben und des Raums der Farbreize, vorausgesetzt man benutzt als Operation im Raum der Reize die additive Mischung.

Diese Strukturähnlichkeit zwischen Reizen und Empfindungen wurde von dem Mathematiker Hermann Grassmann 1853 (Grassmann, 1853) explizit aufgeklärt: Er konnte zeigen, daß der Farbraum die strukturellen Eigenschaften eines 3-dimensionalen, linearen Vektorraums besitzt. Interessanterweise erwiesen sich die empirischen Gesetze, die Grassmann für seine Ableitung annahm, als teilweise falsch. In seiner Begründung des Vektorraums spielt die Additivität der Helligkeit eine wesentliche Rolle. Demnach soll die Helligkeit eines Lichts $a+b$, das die additive Mischung der Lichter a und b ist, gleich der Summe der Helligkeiten von a und b sein. Dieses Additivitätsgesetz gilt aber in der Regel nicht. Bereits von Schrödinger (1920) wurde aber darauf hingewiesen, daß diese Annahme Grassmanns zur Ableitung der Linearität des Farbraums, der auf der Nichtunterscheidbarkeit von Farbreizen beruht, nicht notwendig ist.

Helmholtz (1952) benutzte keine Farbkreisel, sondern Prismen und Spalte um Lichtstrahlen durch Übereinanderprojektion zu mischen, wie das auch Newton getan hatte. Während Maxwell seine Farbtafel nach einer Methode erzeugte, bei der ein Beobachter stets zwei nahezu weiß aussehende Flächen abgleichen muß, versuchte Helmholtz eine Farbtafel durch die Konstruktion von Komplementärfarbreizen zu konstruieren. Dies sind Reize, die beim Zusammenmischen weiß aussehen. Er kam jedoch aufgrund zu schwacher Lichtquellen und schlecht geschliffener Prismen zur Ansicht, daß nur eine einzige Farbe des Spektrums eine Komplementärfarbe besäße. Grassmann (1853) erkannte, daß diese Aussage im Widerspruch zu Newtons Schwerpunktregel steht, was Helmholtz (1855) schließlich veranlaßte, seine Experimente mit besseren Prismen zu wiederholen und festzustellen, daß wesentlich mehr als ein Paar Komplementärfarben im Spektrum enthalten sind. Die Untersuchungen von Helmholtz führten schließlich zur sogenannten Dreifarben-theorie, die bereits früher von Young (1807) angedeutet worden war und deren wesentliche Behauptung darin besteht, daß die 3-Dimensionalität des Farbensehens auf die Existenz von 3 Rezeptortypen mit unterschiedlichen spektralen Empfindlichkeitsfunktionen zurückzuführen ist.

Spektrale Farbmischungen

Von Maxwell (1860) wurden die ersten spektralen Empfindlichkeitsfunktionen der 3 Rezeptortypen aus Messungen von Farbabgleichen berechnet und dargestellt. Während Maxwell (1855) noch eine Farbscheibe zur Konstruktion seiner Farbtafel benutzt hatte, beruhen die Empfindlichkeitsfunktionen von 1860 auf additiven Mi-

schungen, die mit Hilfe einer optischen Spektralapparatur gewonnen wurden. In ihr konnten Mischungen von drei monochromatischen Reizkomponenten mit einem weißen Referenzstrahl abgeglichen werden.

Aus der Sicht der Psychophysik hat die Mischung in der Spektralapparatur gegenüber der Mischung mit Hilfe von Farbscheiben einen wesentlichen Vorteil: Die Strahlung, die von einer Farbscheibe ins Auge des Beobachters gelangt, ist das Produkt aus Beleuchtung und Reflektanz der Papieroberfläche, so daß eine exakte Spezifikation des Reizes nahezu unmöglich ist. In einer Spektralapparatur war dagegen bereits zu Maxwells und Helmholtz' Zeiten eine genaue Spezifizierung des Reizes möglich. Dazu wurden die Fraunhoferschen Linien des Sonnenlichts benutzt. Der Optiker Josef Fraunhofer hatte 1817 entdeckt (Fraunhofer, 1817), daß im Spektrum des Sonnenlichts dunkle Linien zu sehen sind, mit deren Hilfe das Brechungsvermögen von Prismen und die Wellenlängen der einzelnen Komponenten des Spektrums identifiziert werden können. Voraussetzung dafür ist jedoch ein sehr sorgfältig geschliffenes Prisma und die Verwendung eines sehr dünnen einfallenden Lichtstrahls. Mit Hilfe der Fraunhoferschen Linien konnten bereits von Maxwell und Helmholtz die Meßergebnisse an unterschiedlich konstruierten Spektralapparaturen verglichen und standardisiert werden.

Die Spektralapparatur blieb dann auch in unterschiedlichen Konstruktionsformen etwa bis 1980 das wichtigste Instrument zur Untersuchung des Farbensehens. Nahezu alle bedeutenden Erkenntnisse der Farbenlehre ruhten bis dahin auf Experimenten mit spektralen Farbmischgeräten. Um nur einige zu nennen: die Bestimmung der spektralen Empfindlichkeitsfunktionen durch Vergleiche der Mischdaten Normalsichtiger und Farbenblinder durch König und Dieterici (1893), die Konstruktion der Heringschen Gegenfarbencodes durch Brückner (1927) und Jameson und Hurvich (1955) und die Entwicklung des CIE Normvalenzsystems von 1931 durch Wright (1928/1929/1930) und Guild (1931/1932).

Die Gegenwart: Videobildschirme im Farblabor

Die Technologie der spektralen Mischapparaturen verlor ihre Vorherrschaft in den Farblabors als zu Beginn der 80er Jahre die ersten rechnergesteuerten Farbmonitore entwickelt wurden, deren Qualität und Leistung für die Durchführung experimenteller Untersuchungen hinreichend war. Farbmonitore hoher Güte gab es durch die Einführung des kommerziellen Farbfernsehens bereits früher, die verfügbaren Rechner waren zur Steuerung eines Videobildschirms jedoch entweder nicht leistungsfähig genug oder wesentlich teurer als spektrale Mischapparaturen. Erst mit der Entwicklung kleiner und leistungsfähiger Laborrechner wurde es möglich, einen Videobildschirm hinreichend präzise zu steuern, so daß der Einsatz in Wahrnehmungsexperimenten interessant wurde.

Wie auch die spektralen Mischgeräte arbeiten Videobildschirme nach dem Prinzip der additiven Farbmischung. Auf der Oberfläche des Bildschirms befinden sich

Tripel von Farbpunkten oder Streifen, die von hinten durch eine Maske mit Elektronen bestrahlt werden. Die Farbpunkte bestehen aus Phosphoren, die bei Bestrahlung mit Elektronen elektromagnetische Strahlung abgeben. Bei hinreichend großem Beobachtungsabstand verschmelzen die Punktetripel und erscheinen in der Mischfarbe. Das Videobild wird dadurch erzeugt, daß 3 Elektronenstrahlen zeilenweise über die Bildschirmmaske streichen und synchron zur Bewegung in ihrer Intensität gesteuert werden. Die Intensität der von den getroffenen Phosphoren abgegebenen Strahlung hängt monoton von der Intensität des jeweiligen Elektronenstrahls ab.

Diese hier nur grob zu skizzierende Funktionsweise eines Videobildschirms bestimmt auch seine Vor- und Nachteile gegenüber spektralen Mischapparaturen. Zuerst die wesentlichen Vorteile:

1. Der Bildinhalt kann sehr komplex sein. Während bei einer Spektralappartur in der Regel nur ein doppeltes Testfeld und ein Umfeld zur Verfügung stehen, können auf einem Videobildschirm komplexe Muster bis hin zu photographischen Abbildungen erzeugt werden. Damit ist auch eine Simulation natürlicher Szenen möglich.

2. Der Bildinhalt kann durch die Software eines Rechners bestimmt werden und ist daher sehr flexibel und leicht zu ändern.

3. Durch geeignete Programmierverfahren können in einfacher Weise dynamische Darbietungen komplexer Reize realisiert werden, wie sie etwa zur Untersuchung der Bewegungswahrnehmung notwendig sind.

4. Die spektralen Eigenschaften von Bildschirmphosphoren unterliegen einer geringen Alterung. Ihre Spektren sind daher über längere Zeit stabil als dies bei thermischen Lichtquellen der Fall ist.

Diesen Vorteilen stehen aber auch eine Reihe gravierender Nachteile gegenüber:

1. Die Spektren der Phosphore sind fest vorgegeben und können nicht abgeändert werden. Beim Bildschirm ist das Reizmaterial nur 3-dimensional. Experimente, die die 3-Dimensionalität des Farbraums in Frage stellen, können daher mit einem Videosystem nicht durchgeführt werden.

2. Die Menge der mit den üblichen Bildschirmphosphoren erzeugbaren Farbeindrücke ist deutlich kleiner als die durch eine optimale Spektralappartur erzeugbare Menge von Farben. Spektralfarben können stärker gesättigt sein und die Lichtquellen und Abbildungsmethoden von Spektralapparaturen erlauben höhere Intensitäten als sie bei Monitoren möglich sind.

3. Das zyklische Ansteuerungsverfahren der Bildschirmphosphore durch die Elektronenstrahlen erzeugt keine stationäre Belichtung, sondern eine Schwingung mit der Frequenz der Bildwiederholfrequenz des Videosystems. Diese ist in der Regel nur in geringem Umfang zu beeinflussen und bei vielen kommerziellen Systemen für einen zeitlich homogenen Eindruck zu niedrig. Das merkliche Bildschirmflimmern verschwindet erst bei Bildwiederholfrequenzen von mehr als 80 oder gar 90 Hz.

4. Das zyklische Ansteuerungsverfahren stellt gleichzeitig auch eine Grenze für das zeitliche Auflösungs-

vermögen eines Videosystems dar. Die Dauer einer Periode ist die minimale Darbietungsdauer und alle Darbietungsdauern sind ganzzahlige Vielfache der Periodendauer.

Die geschilderten Nachteile sind prinzipieller Art und auch durch besonders aufwendige Konstruktionsmethoden nicht zu ändern. Vermindert werden kann bestenfalls der Nachteil der Periodizität des Videosystems. Während die Wiederholfrequenzen früher in der Regel bei 50 Hz lagen, können mit neueren Geräten auch Wiederholfrequenzen von über 100 Hz erzeugt werden. Für Untersuchungen im Bereich des Farbsehens wird dadurch die Periodizität der Videobildschirme ein eher unbedeutendes Problem.

Beim Erzeugen von Farbenmischungen mit Hilfe von Videosystemen sind einige Probleme zu beachten, die in spektralen Mischgeräten nicht auftreten.

1. Der Zusammenhang zwischen der Steuerspannung an der Kathode der Bildröhre und der Leuchtdichte eines Ausschnitts der Bildröhrenoberfläche ist nicht linear. Die Koordinaten der Steuerprogramme müssen daher zum Erzeugen bestimmter Farbwerte mit Hilfe der sogenannten „Gammafunktion“, der Bildröhrenkennlinie korrigiert werden. Durch die Ansteuerung über einen Rechner kann diese Korrektur leicht durchgeführt werden, setzt aber die exakte physikalische Messung der Bildröhrenkennlinie voraus.

2. Die Bildröhrenmaske ist so konstruiert, daß bei exakter Fokussierung der Elektronenstrahlen und bei korrekter geometrischer Anordnung der Strahlungsquellen in der Bildröhre jede der drei Strahlungsquellen jeweils nur die ihr zugeordneten Phosphorpunkte bestrahlen kann. Fokussierungs- oder Justagefehler („Konvergenzfehler“) können dazu führen, daß beispielsweise der Elektronenstrahl, der den blauen Pigmenten zugeordnet ist, auch ein anderes Pigment anregt, möglicherweise auch nur bei sehr hohen Intensitäten. Dies hat eine Verletzung der Additivität des Systems zur Folge. Grundsätzlich sind auch solche Fehler durch die Steuersoftware korrigierbar, eine Korrektur würde aber je nach Bildschirm- und Farbauflösung einen enormen Speicher- oder Rechenaufwand zur Folge haben.

3. Die Ansteuerung der einzelnen Farbkanäle eines Videomonitors durch den Rechner erfolgt über Digital-Analog-Wandler (DAC), deren Auflösungsvermögen begrenzt ist. Die heute kostengünstig verfügbaren DAC-Bausteine haben ein Auflösungsvermögen von 8 Bit, was 256 Spannungsstufen entspricht. Durch die Nichtlinearität der Bildröhrenkennlinie gehen davon etwa 40 Stufen verloren und die verbleibenden Stufen erzeugen keine gleichabständigen Leuchtdichtewerte. Diese Auflösung ist für Diskriminationsexperimente in der Regel zu gering: Man kann damit keine physikalisch unterschiedlichen, direkt aneinander grenzenden Farbfelder erzeugen, die von Normalsichtigen nicht unterscheidbar sind. Es gibt aber auch Systeme mit einer Auflösung von bis zu 12 Bit pro Farbkanal. Mit diesen sind auch Diskriminationsexperimente möglich.

Für die meisten experimentellen Fragestellungen überwiegen die Vorteile von Videosystemen bei weitem deren Nachteile. Eine Reihe von experimentellen Fragestellungen und Befunden wären ohne diese Systeme nicht möglich gewesen. Dazu zählen unter anderem Befunde aus dem Bereich der Farb- und Bewegungswahrnehmung (Cavanagh, Favreau & Tyler, 19??) die auf eine getrennte Verarbeitung von Farb- und Bewegungsinformation hindeuten und Ergebnisse von Experimenten zu Kontexteffekten und zur Farbkonstanz, die auf der Simulation von Beleuchtungsänderungen in komplexen Szenen beruhen (Brainard & Wandell, 1992; Lucassen & Walraven, 1993; Bäuml, 1994).

Gerade der letzte Punkt spricht Themen an, die erst durch den Einsatz von Videosystemen ins Labor geholt werden können: Simulationen natürlicher Verhältnisse. Im Rahmen einer ökologischen Orientierung hat die Wahrnehmungspsychologie vor jedem Experiment die Frage zu beantworten, welches biologische Problem das zu untersuchende Wahrnehmungssystem eigentlich zu lösen hat. In dieser Hinsicht können beispielsweise linear-affine Theorien von Kontexteffekten (Brainard & Wandell, 1992; Bäuml, 1994) eine durchaus befriedigende Erklärung der Farbkonstanz geben, auch wenn es leicht ist, durch geschickte Auswahl des (künstlichen) Reizmaterials empirische Widersprüche zu diesen Theorien zu finden. Die Orientierung in einer natürlichen Umwelt verlangt aber keine Invarianz gegenüber beliebigen Beleuchtungsänderungen, sondern nur Invarianz gegenüber Änderungen der natürlichen Beleuchtung. Und solche können mit Videosystemen recht gut simuliert und experimentell untersucht werden.

Literatur

- Bäuml, H. (1994). Color appearance: effects of illuminant changes under different surface collections. *Journal of the Optical Society of America A*, **11**, 531–542.
- Brainard, D. H. & Wandell, B. A. (1992). Asymmetric color matching: how color appearance depends on the illuminant. *Journal of the Optical Society of America A*, **9**, 1433–1448.
- Brückner, A. (1927). Zur Frage der Eichung von Farbensystemen. *Zeitschrift für Sinnesphysiologie*, **58**, 322–362.
- Cavanagh, P., Tyler, C. W. & Favreau, O. E. (1984). Perceived velocity of moving chromatic gratings. *Journal of the Optical Society of America A*, **1**, 893–899.
- Fechner, G. Th. (1860). *Elemente der Psychophysik*. Leipzig: Breitkopf und Härtel.
- Fraunhofer, J. (1817). Bestimmung des Brechungs- und Farbenzerstreuungs-Vermögens verschiedener Glasarten, in Bezug auf die Vervollkommnung achromatischer Fernrohre. *Denkschriften der königlichen Akademie der Wissenschaften zu München*, **5**, 193–226 (auch abgedruckt in *Gilberts Annalen der Physik*, **56**, 264–313).
- Goethe, J. W. von (1810). *Zur Farbenlehre*. Tübingen: Cotta.
- Grassmann, H. (1853). Zur Theorie der Farbenmischung. *Poggendorffs Annalen der Physik und Chemie*, **89**, 69–84.
- Guild, J. (1931/1932). The colorimetric properties of the spectrum. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, **230A**, 149–187.
- Helmholtz, H. (1852). Über die Theorie der zusammengesetzten Farben. *Poggendorffs Annalen der Physik und Chemie*, **87**, 45–66 (auch in *Müllers Archiv*, ??, 461–482)
- Helmholtz, H. (1855). Über die Zusammensetzung von Spectralfarben. *Poggendorffs Annalen der Physik und Chemie*, **94**, 1–28
- Jameson, D. & Hurvich, L. M. (1955). Some quantitative aspects of an opponent colors theory. I Chromatic responses and spectral saturation. *Journal of the Optical Society of America*, **45**, 546–552.
- König, A. & Dieterici, C. (1893). Die Grundempfindungen in normalen und anomalen Farbensystemen und ihre Intensitätsverteilung im Spektrum. *Zeitschrift für Psychologie und Physiologie der Sinnesorgane*, **4**, 241–347.
- Lucassen, M. P., & Walraven, J. (1993). Quantifying color constancy: evidence for nonlinear processing of cone-specific contrast. *Vision Research*, **33**, 739–759.
- Maxwell, J. C. (1855). Experiments on colour, as perceived by the eye, with remarks on colour blindness. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, vol 21, part 2. Nachdruck in W. D. Niven (Hrsg.) *The scientific papers of James Clerk Maxwell*, Vol. I. New York: Dover Publications.
- Maxwell, J. C. (1860). On the theory of compound colours, and the relations of the colours of the spectrum. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, **150**, 57–84. Nachdruck in W. D. Niven (Hrsg.) *The scientific papers of James Clerk Maxwell*, Vol I. New York: Dover Publications.
- Newton, I. (1672). New theory about light and colors. *Philosophical Transactions*, London, No. **80**, 3075–3087.
- Newton, I. (1730). *Opticks or a treatise of the reflections, refractions, inflections & colours of light*, 4th ed. Reprinted by Dover Publications, New York.
- Schrödinger, E. (1920). Grundlinien einer Theorie der Farbenmetrik im Tagessehen. *Annalen der Physik*, **IV**, **63**, 397–456.
- Stevens, S. S. (1975). *Psychophysics: Introduction to its perceptual, neural, and social prospects*. New York: Wiley.
- Wright, W. D. (1928/29). A re-determination of the trichromatic coefficients of the spectral colours. *Transactions of the Optical Society of London*, **30**, 141–164.
- Wright, W. D. (1929/30). A re-determination of the mixture curves of the spectrum. *Transactions of the Optical Society of London*, **31**, 201–218.
- Young, T. (1807). On the theory of light and colours. In *Lectures in natural philosophy*, vol. 2. London: Printed for Joseph Johnson, St. Pauls's Church Yard, by William Savage.